

В центробежных аппаратах осуществляется дополнительный внешний подвод механической энергии, что позволяет создавать в них интенсивную термогидродинамическую обстановку и сильно развитую межфазную поверхность [1-3]. Впервые процесс теплообмена вблизи вращающегося диска, погруженного в жидкость описал И.А.Кибель [4]. Основываясь на решении соответствующей гидродинамической задачи, выполненной Карманом и Кокрэном, он рассчитал процесс теплообмена в ламинарной постановке при числах Прандтля $Pr=1$. Поля скоростей и температур считались независимыми друг от друга. В дальнейшем коэффициент теплоотдачи от вращающегося диска в жидкость (воздух) определяли Вагнер, Дэвис, Дорфман, Лойцянский и др. Подробный анализ этих публикаций приводится в работе [5]. Необходимо отметить один общий недостаток выше перечисленных работ: задачи решались в изотермической постановке. Рассмотрим работы, в которых обсуждается термогидродинамические параметры открытых центробежных пленок. В них реализуется тонкопленочный режим течения жидкости, характеризующийся малым термическим сопротивлением и развитой межфазной поверхностью. Бромли [6] получил формулу для коэффициента теплоотдачи для вращающегося диска при обновременном испарении и конденсации одного и того же вещества на противоположных его сторонах. Толщина пленки рассчитывалась им по Хинце-Мильборну [7] при допущении, что жидкость на диске течет только в радиальном направлении. Почти всегда возникавшие волны несколько увеличивали коэффициент теплоотдачи. Теоретический анализ теплообмена в слое вязкой жидкости на вращающемся диске провел Дорфман Л.А. [8]. В работе рассмотрено ламинарное течение без учета поверхностного натяжения и сопутствующих ему волновых явлений, а также трения жидкой пленки относительно газовой среды. Также не учитывалось тепловое взаимодействие на границе раздела жидкость-газ, а физические свойства жидкости считались постоянными. Численный расчет показал, что коэффициент теплообмена от диска с ростом числа Рейнольдса существенно увеличивается, почти пропорционально $Re^{0.5}$. Математические модели процессов теплообмена, не учитывающие зависимость вязкости от температуры, не могут считаться удовлетворительными. Действительно, в [9] доказывается, что даже слабая зависимость вязкости от температуры приводит к качественному отличию течения Пуазейля от классического. Вопросам теплообмена на вращающихся дисках посвящен ряд работ Тябина Н.В. с сотрудниками [10-12]. Им рассмотрено неизотермическое течение вязкой жидкости, текущей по поверхности плоского диска, с учетом возможного отставания жидкости и инерционных членов уравнения движения. При этом температура диска задана, как у Дорфмана Л.А. [8] в виде двучлена: $T=T_1(\delta)+T_2(\delta) r^2$, (1) где δ - толщина пленки, r - радиус диска. Полученные результаты позволяют рассчитать коэффициент теплоотдачи от диска к пленке жидкости. Экспериментальная проверка полученных

зависимостей не проводилась. Решение задачи теплообмена при тонкопленочном течении жидкости в поле центробежных сил, с учетом зависимости ее вязкости от температуры, выполнено в работах [5, 13,14]. В работе [13] рассмотрен процесс теплообмена в вязкой и степенной жидкости при тепловых граничных условиях 1 рода ($T=\text{const}$) на границе раздела фаз (стенка-жидкость, жидкость-газ); конвективные члены в уравнении движения пренебрежены, а в уравнении энергии осреднены по методу Петухова С.Б. Зависимость вязкости от температуры была задана в виде степенного ряда. Аналогичная задача для конуса для тепловых граничных условий второго рода ($q=\text{const}$) была решена в работе [14]. Экспериментальная проверка полученных зависимостей была выполнена на примере плоского диска. Подробный анализ этой задачи выполнен в работах Булатова [5,15]. В пленке жидкости условно выделяется три зоны: термический начальный участок, область прогрева пленки и область установившегося теплообмена. Определены размеры зон и их тепло-гидродинамические параметры. В третьей зоне переход температур между поверхностью ротора и поверхностью пленки незначителен и составляет, как правило, несколько градусов. Поэтому третья зона характеризуется интенсивной массоотдачей, что приводит к уменьшению расхода и в некоторых случаях к высыханию пленки. Экспериментальная проверка полученных зависимостей выполнена для среднemasсовой температуры жидкости от плотноститеплового потока и расхода жидкости. Работы [16-20] посвящены экспериментальному изучению процессов теплообмена при течении жидкой пленки по вращающейся поверхности. В [16] исследования проводились на вращающемся конусе, с внутренней стороны которого реализовалось тонкопленочное течение. Авторы приходят к выводу, что величина коэффициента теплоотдачи при прочих равных условиях зависит от плотности орошения поверхности и величины центробежной силы, причем от второй - в большей степени. Теплообмен при испарении пленки жидкости и конденсации пара на вращающейся поверхности рассмотрен Рифертом В.Г.с сотрудниками [17,18] и Васильевым А.В. [19]. Режимы парообразования и интенсивность теплообмена при кипении жидкости на вращающейся поверхности был исследован Пуховым И.И. [20]. Булатовым А.А. рассмотрена задача об испарении летучей жидкости в отсутствии подвода тепла [21]. Интенсивное испарение жидкости вызывает ее охлаждение и развивается тепловой пограничный слой. Им же, в квазитурбулентном предположении пристенного пограничного слоя проведено математическое моделирование процесса пузырькового кипения жидкости в центробежном пленочном испарителе [5]. Теоретические зависимости подтверждены экспериментальными данными в первом случае - Дунского В.Ф. [22], во втором - Пухового И.И. [20]. В [23] рассматривается теплоотдача при ламинарно-волновом и турбулентном режимах, а также устойчивость ламинарно-волнового течения. Теплоотдача значительно улучшается с увеличением скорости вращения диска при обоих

режимах течения. В работе [24] поведение центробежной жидкой пленки рассмотрено для конического ротора при тепловых граничных условиях второго рода с учетом тепловых потерь в парогазовую фазу. Получены зависимости для расчета среднemasсовой температуры, числа Нуссельта и других технологических параметров процесса нагрева пленки. Авторы работ [25-27] изучали распределение температур перегретой пленки жидкости, движущейся по вращающемуся диску. Исследовалась морская и солоноватая вода массовой концентрацией 2-6 %. Полученные теоретические и экспериментальные данные могут быть использованы при расчете центробежных опреснительных установок. Результаты показали, что при постоянной паропроизводительности с уменьшением расхода жидкости и ростом начального перегрева жидкости радиус диска убывает. Экспериментальные работы по применению центробежных пленочных аппаратов для проведения массообменных процессов были выполнены А.А. Александровским [28-30] и Р.Ш.Сафиным [31]. Экспериментальные работы А.А. Александровским были выполнены на примерах абсорбции в системах аммиак-вода, этанол-вода, ацетон-вода. Была выявлена зависимость коэффициента массопередачи в зависимости от расхода жидкости, скорости движения газовой фазы, от числа оборотов ротора аппарата, от угла конусности рабочего элемента ротора. Аналогичные исследования были проведены Р.Ш.Сафиным в центробежном аппарате новой конструкции [32]. Одним из первых, кто предложил математическую модель массообмена в пленке жидкости, текущей по вращающемуся диску был В.Г. Левин [33]. Массообмен был проанализирован в пределах диффузионного пограничного слоя. В работе [34] рассмотрена задача массообмена в слое жидкости на вращающейся спиральной поверхности в отсутствие волнообразования. Определены локальный и средний коэффициенты массоотдачи. Исследованию входного участка этой задачи с учетом на процесс влияния газового потока была посвящена работа [35]. Экспериментальная работа по абсорбции кислорода и двуокиси углерода водой, текущей по вращающейся конической поверхности была выполнена авторами работы [36]. Авторы отмечают отсутствие надежной теоретической модели, адекватно описывающей результаты эксперимента. Работы [37-40] посвящены исследованию абсорбции газов в тонких пленках жидкости, текущих в центробежном поле. Рассмотрен процесс абсорбции плохо растворимого газа в изотермических условиях. Это означает, что основное сопротивление массообмену сосредоточено в жидкой фазе. Задача решается введением модели диффузионного пограничного слоя методом интегральных соотношений. В пленке жидкости выделяются две области: формирования диффузионного пограничного слоя и установления равновесного массообмена. Считается, что на свободной поверхности жидкости устанавливается равновесная концентрация абсорбируемого газа согласно закону Генри. В первой области критерий Шервуда монотонно убывает до значения $Sh=3.64$, а во второй области не

меняется. Предлагается использовать протяженность первой зоны для оценки эффективности процесса абсорбции. Неизотермическая абсорбция газа в пленку вязкой жидкости, текущей по поверхности вращающегося конуса, выполнена с учетом теплообмена в окружающую среду. Совместное решение уравнений движения, энергии и диффузии позволили определить: изменение толщины пленки жидкости, теплового и диффузионного пограничных слоев, протяженности областей, температуры и концентрации растворенного газа, коэффициентов тепло- и массоотдачи. Показано, что как и в случае изотермической абсорбции, критерий Шервуда асимптотически стремится к постоянному значению $Sh=3.64$. Изотермическая абсорбция газа центробежной пленкой жидкости с учетом сопротивления переносу импульса и массы со стороны газовой среды была рассмотрена в условиях ламинарного движения фаз, отсутствия волнообразования на свободной поверхности жидкости и граничных условиях четвертого рода. Процесс условно рассматривается в двух областях и для них получены аналитические зависимости для расчета параметров течения фаз и абсорбции газа. Модель охватывает случаи абсорбции плохо-, средне- и хорошо растворимых газов пленками жидкости в поле центробежных сил. Проведены экспериментальные исследования по абсорбции двуокиси углерода (плохо растворимый газ). В работах [41-45] проведено математическое моделирование хемосорбционного поглощения газов пленкой жидкости, текущей по поверхности конической насадки. Уравнения конвективной диффузии, записанных для жидкой и газовой фаз, решались методом интегральных соотношений, используя модель диффузионного пограничного слоя без учета на процесс теплоты абсорбции и химического превращения, т.е. в изотермической постановке. В этих работах оценены степень и характер влияния на процесс режимных параметров, концентрации и свойств абсорбируемого газа и хемосорбента. Считалось, что на свободной поверхности пленки устанавливается равновесная концентрация газа по закону Генри и основное сопротивление масопередачи заключено в жидкой фазе. В работе [39] рассмотрена хемосорбция трудно растворимых газов в центробежной пленке для случая, когда газ, растворяющийся в жидкости вступает в объемную химическую реакцию первого порядка. Получены зависимости для количественной оценки процесса хемосорбции, выявлено влияние константы химической реакции на коэффициент ускорения. В работах [41-44] рассмотрен случай, когда в объеме пленки жидкости происходит мгновенная химическая реакция. Получены аналитические зависимости для расчета коэффициентов массоотдачи и координаты полного исчерпывания хемосорбента. Установлено, что наиболее интенсивный процесс хемосорбции происходит в начальной области. В работах [43-44] рассмотрено математическое моделирование абсорбции газов центробежной жидкой пленкой, осложненное объемной необратимой химической реакцией второго порядка. Получены

зависимости для расчета технологических параметров процесса и установлено, что во второй области, области установления равновесия, критерий Шервуда имеет постоянное значение и равен $Sh=3.64$. Проведенные экспериментальные исследования на примере водных растворов моно- и диэтаноламинов и диоксида углерода (абсорбция, сопровождаемая объемной химической реакцией второго порядка) показали адекватность математического описания физике процессов. В заключение отметим, в центробежной пленке тепло- и массообменные процессы в условиях волнообразования и турбулентности, а также взаимодействия пленки жидкости конвективной газовой фазой не изучены.